ARTIGO ORIGINAL

Utilização do biocarvão como meio filtrante de *wetland* construído vertical empregado no tratamento de esgoto bruto

Biochar as a filter material of vertical constructed wetland in the raw wastewater treatment

Data de entrada: 08/04/2020

Data de aprovação: 12/11/2020

Eduardo Bello Rodrigues[1*] | Pablo Heleno Sezerino[1] | Daniele Damasceno Silveira[1] | Everton Skoronski[1] | Flávio Rubens Lapolli[1]

DOI: https://doi.org/10.36659/dae.2022.029

ORCID ID
Rodrigues EB https://orcid.org/0000-0002-8060-8555
Sezerino PH https://orcid.org/0000-0002-2249-0878
Silveira DD https://orcid.org/0000-0002-8299-0030
Skoronski E https://orcid.org/0000-0002-8554-8272
Lapolli FR https://orcid.org/0000-0002-4789-4019

Resumo

A utilização de diferentes materiais filtrantes tem sido alvo de pesquisas no emprego da ecotecnologia tipo *wetland* construído no tratamento de águas residuárias a fim de melhorar a eficiência de remoção de poluentes. Neste sentido, o presente estudo objetivou a identificação das potencialidades da utilização do biocarvão como meio filtrante em um *wetland* construído de escoamento vertical tipo sistema francês (WV-SF), empregado no tratamento de esgoto bruto. O módulo estudado (3,10 m² de área superficial) operou ao longo de 7 meses com uma carga hidráulica média de 0,37 $m.d^{-1}$, com alternância de 3,5 dias de alimentação e 3,5 dias em repouso. As eficiências globais de remoção de poluentes promovidas pelo WV-SF foram de 73%, 85%, 56%, 78% e 87% para DQO, $DBO_{5,20}$ Ptotal, NTK e SST, respectivamente. A condição em que foi operado o WV-SF representa uma redução em 60% do requerimento de área superficial de um clássico wetland Sistema Francês de dois estágios. Desta forma, o biocarvão utilizado como material filtrante neste estudo se mostrou bastante eficaz e promissor para a remoção de contaminantes de águas residuárias por meio dos sistemas *wetlands* construídos; além de ser um material originário de um resíduo de usina termelétrica.

Palavras-chave: Tratamento de esgoto bruto. *Wetland* construído. Biocarvão. Reaproveitamento de resíduos.

Abstract

The use of different types of filter material in constructed wetlands ecotechnology applied to wastewater treatment has been the research subject to improve the efficiency of removing some pollutants. In this sense, this study aimed to identify the potential of biochar (industrial waste) as a filter material in a French vertical flow constructed wetland modified fed with raw domestic wastewater. The studied module (3.10 m² of surface area) operated for 7 months with an average hydraulic load rate of 0.37 $m.d^{-1}$*, with an alternation cycle with 3.5 days of feeding and 3.5 days of rest. The overall pollutant removal efficiencies by the WV-SF were 73%, 85%, 56%, 78%, and 87% for COD, BOD, total phosphorus, NTK, and SST, respectively. The operational strategy used on WV-SF evaluated in this study represented a reduction of 60% of the superficial area than the classic French vertical*

[1] Universidade do Estado de Santa Catarina - Lages - Santa Catarina - Brasil.
* **Autor correspondente:** eduardo.rodrigues@udesc.br.

CC BY NC

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

flow constructed wetland with two stages. Thus, the biochar, residue from thermoelectric, used in this study as a filter material showed to be quite effective and promising for the pollutants removal from wastewater in constructed wetlands.
Keywords: *Raw wastewater treatment. Constructed wetland. Biochar. Waste reuse.*

1 INTRODUÇÃO

Wetlands construídos (WCs) têm sido uma ecotecnologia amplamente utilizada como alternativa para o tratamento de esgotos em pequenas comunidades (< 5.000 equivalente populacional), devido a sua simplicidade operacional, baixo custo comparado a outros sistemas comumente empregados, resistência às variações de cargas hidráulicas e orgânicas afluentes e boa eficiência de remoção de poluentes (KADLEC; WALLACE, 2009; STEFANAKIS; TSIHRINTZIS, 2012; MORVANNOU et al., 2015; SEZERINO et al., 2015). Dentre as variantes dos WCs, destaca-se o conjunto de módulos de escoamento vertical denominado sistema francês (WV-SF). Essa modalidade de *wetlands* é composta por dois estágios, sendo três módulos em paralelo no primeiro e dois em paralelo no segundo. No primeiro estágio, o esgoto bruto é alimentado de forma intermitente durante um período de 3,5 dias em cada módulo, retomando a alimentação após 7 dias de descanso. Já no segundo estágio, a alternância é de 7 dias de alimentação e 7 dias de descanso (MOLLE et al., 2005). Essa alternância no regime de alimentação tem a função de garantir uma adequada transferência de oxigênio para dentro do leito, estabilizar o depósito de lodo na camada superficial do leito durante o período de repouso e garantir um adequado desenvolvimento das plantas (KADLEC; WALLACE, 2009; MORVANNOU et al., 2015). Um dos fatores de maior relevância na eficiência do tratamento do esgoto afluente é o depósito de lodo formado no primeiro estágio (em média de 2,5 cm/ano) (KANIA et al., 2019; MOLLE, 2014; BARCA et al., 2013), que tem como principais funções a melhoria na distribuição do esgoto na superfície do filtro, adsorção de amônia na matéria orgânica do lodo e aumento da atividade biológica (MOLLE, 2014).

O dimensionamento do sistema francês é baseado em cargas de poluentes e hidráulica aplicadas em unidade de área superficial, a fim de garantir as eficiências e condições hidráulicas adequadas. Os valores recomendados são de 300gDQO.m².d^{-1}, 150gSST.m².d^{-1}, 25-30gNTK.m².d^{-1} e 0,37m.d^{-1} (MOLLE et al., 2005). Mas informações sobre parâmetros de projeto e dimensionamento desta modalidade empregada no Brasil podem ser encontradas no documento “Dimensionamento de *wetland* no Brasil”, elaborado por von Sperling e Sezerino (2018).

Morvannou et al. (2015) conduziram uma pesquisa que abrangeu diversos WV-SF localizados na Europa, operando em escala real e atendendo pequenas comunidades (< 5.000 habitantes). Todos os sistemas avaliados demonstraram boas eficiências já no primeiro estágio, atingindo eficiências médias de remoção e concentração de efluentes de 83% e 38 mg.L^{-1}, 77% e 126 mg.L^{-1}, 59% e 27 mg.L^{-1} para SST, DQO e NTK, respectivamente. Nesse sentido, estudos objetivando a redução da área requerida pelo sistema francês, utilizando então apenas o primeiro estágio, foram conduzidos. Silveira et al. (2015) aplicaram fundo saturado no primeiro estágio do sistema francês a fim de promover a nitrificação e a desnitrificação simultânea em um único estágio, eliminando assim o segundo e, consequentemente, a área.

Com relação à transformação do nitrogênio em WV-SF, este tende a sofrer maiores variações pois depende restritamente das condições operacionais e de projeto, tais como características do esgoto afluente, tipo de material filtrante, regimes de batelada, além de fatores climáticos (MILLOT et al., 2016). Além disso, a nitrificação é o primeiro processo afetado pela depleção de oxigênio, sendo um indicador relevante para determinar condições favoráveis e que evitem as disfunções de desempenho. Portanto, o desenvolvimento de projetos que promovam melhores condições para o sistema irá influenciar diretamente na remoção dos poluentes, como o nitrogênio, por exemplo. Embora o sistema francês seja bem consolidado, ainda existe um grande campo de investigação no que se refere às melhores adaptações desses sistemas em condições climáticas específicas, materiais filtrantes alternativos e demais aspectos sociais de aceitação da comunidade local (GARCÍA ZUMALACARREGUI, 2018; PAING et al., 2015; KANTAWANICHKUL; KLADPRASERT; BRIX, 2009). Pesquisas desenvolvidas na avaliação de WV-SF submetidos a condições de clima tropical têm demonstrado resultados satisfatórios com apenas o primeiro estágio, atendendo a padrões de lançamento para diferentes localidades (KANTAWANICHKUL; KLADPRASERT; BRIX, 2009; CASELLES-OSORIO et al., 2011; SILVEIRA et al., 2015; LOMBARD LATUNE et al., 2017; GARCÍA ZUMALACARREGUI, 2018; LOMBARD-LATUNE et al., 2018). No Brasil, pesquisas têm sido realizadas a fim de reduzir o requisito de área, utilizando apenas dois módulos do primeiro estágio, o que possibilitaria uma redução em 60% da área do sistema convencional com dois estágios. As condições operacionais e a qualidade do efluente tratado tem demonstrado que essa tecnologia pode ser uma solução atrativa para pequenas comunidades no país (COTA, 2011; LANA et al., 2013; GARCÍA ZUMALACARREGUI, 2018; DE ANDRADE MORAES et al., 2019).

Por fim, é importante destacar a escolha do material filtrante a ser utilizado em sistemas *wetlands* construídos. O material filtrante representa um elemento importante no processo de remoção de poluentes por meio da filtração física, reações químicas e biodegradação (KIM; FORQUET, 2016; PUCHER; LANGERGRABER, 2018). Sendo assim, a escolha do material a ser utilizado deve levar em consideração o custo de aquisição, a capacidade de remoção de poluentes, o suporte para crescimento das macrófitas e a fixação de microrganismos, segurança (produção de resíduos secundários), condutividade hidráulica (características granulométricas) e vida útil do material (SHIWEI et al., 2019; WANG et al., 2020). Substratos utilizados em sistemas WCs que possibilitam o reúso de resíduos resultantes de processos de produção e que contribuam para maiores eficiências na remoção de poluentes, principalmente nitrogênio e fósforo, vêm ganhando espaço na comunidade científica devido aos ganhos ambientais e econômicos (YANG et al., 2018). Dotro et al. (2017) afirmam que para o primeiro estágio do sistema francês a escolha do tipo do material filtrante e suas características são primordiais na manutenção das condições aeróbias do leito assim como na formação e manutenção da camada de lodo superficial.

Diversos substratos alternativos ao uso de pedrisco e areia têm sido propostos como material filtrante a fim de potencializar a eficiência de remoção de alguns poluentes, principalmente no processo de adsorção de nitrogênio e fósforo (PROCHASKA; ZOUBOULIS; ESKRIDGE, 2007; VOHLA et al., 2011; SAEED et al., 2012; SHIWEI et al., 2019; JIA et al., 2020). Dentre eles, é possível citar o biocarvão, um sólido rico em carbono produzido após a pirólise de plantas orgânicas e materiais animais em alta temperatura em um ambiente de baixo ou nenhum oxigênio (SUN et al., 2018; XIONG et al., 2019). Devido as suas particularidades, tais como grande área superficial e volume de microporos, maior retenção de nu-

trientes e fornecimento de carbono, o biocarvão vem ganhando destaque nos últimos anos com resultados satisfatórios no processo de adsorção de poluentes específicos em WCs de fluxo vertical em diferentes configurações (DE ROZARI; GREENWAY; EL HANANDEH, 2016; KIZITO et al., 2017; BOLTON et al., 2019; LI et al., 2019; SAEED et al., 2019; SUDARSAN; SRIHARI, 2019; ZHOU et al., 2019a, 2019b). Jia et al. (2020) apontam alguns estudos da capacidade do biocarvão em realizar a desnitrificação e reduzir as emissões de N_2O.

Kizito et al. (2017) avaliaram o desempenho de WCs de escoamento vertical aplicando dejeto de suíno pós reator anaeróbio. O biocarvão utilizado nesse estudo foi derivado de biomassa de madeira em comparação ao sistema convencional utilizando o pedrisco como meio filtrante, ambos em escala de bancada. Após 300 dias de operação os resultados obtidos para a unidade de biocarvão e de pedrisco foram de 72% e 52%, 83% e 62%, 85% e 59% para DQO, NH_4^+-N e PO_4^{3-}-P respectivamente. Os principais fatores atribuídos às eficiências do biocarvão na remoção de poluentes referiram-se principalmente à grande área superficial, alta porosidade e alta capacidade de troca catiônica, possibilitando maior capacidade de adsorção e maior colonização de microrganismo e, consequentemente maior degradação biológica dos poluentes (DALAHMEH et al., 2011; KIZITO et al., 2017; MOHAN et al., 2014)

Embora haja uma quantidade significativa de trabalhos reportando uso do biocarvão como meio filtrante na remoção de poluentes, trabalhos em escala real ainda são escassos. Resultados obtidos em condições de bancada muitas vezes divergem dos sistemas em escala real, principalmente em relação à dinâmica de remoção de fósforo (ARIAS; DEL BUBBA, 2001; ÁDÁM; KRISTINE SØVIK; KROGSTAD, 2006).

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo identificar as potencialidades da utilização do biocarvão como meio filtrante em um sistema *wetland* construído de fluxo vertical no tratamento de esgoto bruto. As correlações entre o conjunto de dados – utilização do biocarvão, um resíduo potencialmente reaproveitável e, aplicação do sistema francês modificado— deverá fornecer informações para ajudar a melhorar as eficiências de remoção dos poluentes, a adaptação do projeto e operação desses sistemas no futuro em locais de clima subtropical.

2 METODOLOGIA

2.1 Características construtivas e operacionais

O módulo *wetland* de escoamento vertical, do tipo francês, foi construído em escala experimental de campo e implantado junto a uma Estação de Tratamento de Esgotos localizado na cidade de Lages/SC (latitude 27°50`47”S; longitude 50°20`30”W), clima temperado subtropical.

O módulo WV-SF possui 3.10 m² de área superficial e foi preenchido com biocarvão como material filtrante, sendo transplantado com *Eucalipto benthamii* sob uma densidade de 5 mudas por m². Durante os 7 meses de monitoramento foram realizadas duas podas, mantendo-se sempre uma altura mínima de 80 cm. Devido ao foco deste estudo não estar diretamente correlacionado às plantas, uma relação entre o Eucalipto e as eficiências hidrodinâmicas e na remoção de poluentes não será abordada.

A Fig. 1 apresenta um esquema representativo (corte transversal do WV-SF) e imagens da instalação experimental. As condições operacionais e as cargas aplicadas são apresentadas na Tabela 1. Resumidamente, o sistema o WV-SF foi operado com 12 bateladas por dia sob uma vazão de 1,5 $m^3.h^{-1}$, com duração de 3 min e 40 segundos cada batelada. O sistema avaliado neste estudo foi projetado de acordo com os padrões de projeto para o sistema clássico francês (MOLLE et al., 2005; MORVANNOU et al., 2015).



Figura 1 - a) esquema representativo do corte transversal; b) fotos do módulo wetland construído de escoamento vertical.

Tabela 1 - Condições operacionais da unidade monitorada

Parâmetro	WV-SF
Número de unidade	1
Área superficial (m²)	3,10
Profundidade do leito filtrante (m)	0,40
Vazão ($m^3.dia^{-1}$)	1,14
Ciclo alimentação/repouso (dias)	3,5:3,5
Número de pulsos por dia	12
Volume de cada pulso (L)	94,3
Carga hidráulica superficial ($m^3.m^{-2}.dia^{-1}$)	0,37
Carga hidráulica instantânea ($m^3.m^{-2}.hora^{-1}$)	0,5

2.2 Material filtrante utilizado no WV-SF

O biocarvão utilizado como material filtrante é proveniente de uma usina geradora de energia elétrica, com capacidade de 28 MW, a partir da combustão de biomassa florestal a uma temperatura entre 900°C a 1000°C. Atualmente são geradas aproximadamente três toneladas desse material por dia, que são descartados como resíduos. Henne (2018) realizou um estudo de caracterização química do biocarvão (Tabela 2) utilizado neste estudo. Ensaios granulométricos do biocarvão resultaram em um diâmetro específico (d_{10}) de 1,3 mm e coeficiente de uniformidade igual a 2.

Tabela 2 - Composição química orgânica média do biocarvão empregado como material filtrante do WV-SF.

Parâmetro	Média (%)
Teor de umidade	88,4
Carbono	76,4
Hidrogênio	2,38
Enxofre	0,22
Nitrogênio	0,16

Fonte: Adaptado de Henne (2018).

2.3 Monitoramento hidrodinâmico e da qualidade do efluente tratado no WV-SF

O monitoramento da qualidade de tratamento de esgoto sanitário no seu estado bruto realizado pelo módulo WV-SF, iniciou-se em setembro/2019, três dias após seu *start up*. As amostras afluente e efluente do *wetland*, coletadas sempre no segundo dia do regime de alimentação, foram monitoradas a cada três semanas durante um período de 7 meses (setembro/2019 a março/2020), por meio dos seguintes parâmetros: demanda bioquímica de oxigênio ($DBO_{5,20}$) (método 5210 B), demanda química de oxigênio (DQO) (método 5220 D), sólidos suspensos totais (SST) (método 2540 D) nitrogênio total Kjeldahl (NTK) (método 1687), nitrato ($N\text{-}NO^-_3$) (método 4500) e fósforo total (PT) (método 4500-P E) seguindo recomendações do *Standard Methods* (AWWA/APHA/WEF, 2012).

A caracterização hidrodinâmica do sistema foi realizada medindo-se a vazão efluente em intervalos de tempos iguais a um minuto. Essa vazão foi comparada com o volume adicionado ao sistema, equivalente a um pulso de alimentação. O tempo médio de percolação do esgoto dentro da unidade, τ (dia), foi obtido a partir da Eq. 1. Esse cálculo foi adaptado a partir da determinação da distribuição do tempo de detenção hidráulico para sistemas operando em fluxo contínuo (KADLEC; WALLACE, 2009) .

$$\tau = \int_0^\infty tE(t)dt \quad (1)$$

Em que:
t = instante de tempo de medição (d);
E(t)= função distribuição do tempo de percolação (d^{-1})

A função distribuição do tempo de percolação foi calculada pela Eq. 2.

$$E(t) = \frac{Q(t)}{\int_0^\infty Q(t)dt} \quad (2)$$

Em que:
Q(t) = vazão no tempo t ($m^3.d^{-1}$)

A vazão de alimentação do pulso foi de 25,8 L/min e ocorreu por 3 minutos e 42 segundos, totalizando 94,3 litros. Esse valor foi utilizado para o cálculo da recuperação do volume alimentado no sistema (volume efluente/volume afluente). O volume de água que sai do sistema (efluente) foi calculado multiplicando-se a vazão efluente pelo intervalo de tempo relativo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Desempenho do módulo WV-SF na remoção de poluentes

A carga orgânica superficial média aplicada no WV-SF foi de 115 $gDQO.m^{-2}.dia^{-1}$, estando abaixo do valor limite de 300 $gDQO.m^{-2}.dia^{-1}$ recomendado pelas diretrizes francesas (MOLLE et al., 2005). O fato de a carga orgânica ter sido baixa decorre da baixa concentração média de DQO do esgoto bruto (310,8 $mg.L^{-1}$), em relação à média para esgoto doméstico no Brasil (600 $mg.L^{-1}$) (VON SPERLING, 2007). Isso demonstra que o esgoto se apresentou bastante diluído, indicando contribuições na rede coletora que não sejam estritamente esgoto sanitário. Contudo, em relação à carga hidráulica, esta foi mantida em 0,37 $m^{-3}.m^{-2}.dia^{-1}$, corroborando as recomendações do sistema clássico Francês para os módulos de primeiro estágio, ou seja, aquelas unidades que recebem aplicação direta do esgoto bruto afluente, sendo na maioria das vezes preenchidas com material filtrante composto por brita (variação dos diâmetros dos grãos de 2 a 6 mm) (MOLLE et al., 2005).

O desempenho de tratamento promovido pelo WV-SF ao longo dos primeiros 7 meses de operação (Tabela 3) demonstra a potencialidade da ecotecnologia em produzir um efluente com qualidade compatível com os sistemas clássicos. Como mencionado anteriormente, o módulo operou como sendo o equivalente ao primeiro estágio do Sistema Francês, porém com apenas dois módulos, alternando-se entre 3,5 dias de alimentação e 3,5 dias de repouso, o que proporciona uma redução em torno de 60% da área do clássico Sistema Francês com dois estágios (MOLLE et al., 2005).

Tabela 3 - Valores de concentração média afluente e efluente ao longo do período da pesquisa e estatística descritiva dos dados.

	DQO ($mg.L^{-1}$)		DBO ($mg.L^{-1}$)		NTK ($mg.L^{-1}$)		$N\text{-}NO_3^-$ ($mg.L^{-1}$)		PT		SST ($mg.L^{-1}$)	
Número amostral	10		9		5		9		9		10	
	Afl.	Efl.	Afl.	Efl.	Afl.	Efl.	Afl.	Efl.	Afl.	Efl.	Afl.	Efl.
Média	350,0	73,8	171,1	20,6	52,5	6,7	0,6	14,7	3,8	1,5	346,5	12,9
Desvio padrão	241,3	56,9	84,6	9,7	10,2	3,5	0,2	8,5	1,4	0,5	575,5	18,5
Máximo	936,2	232,6	310,0	40,0	68,2	11,4	1,1	25,0	6,1	2,2	1937,0	64,0
Mínimo	124,8	42,9	40,0	5,0	43,0	2,2	0,4	0,5	1,3	0,8	12,0	3,0
Coef. de variação	0,7	0,8	0,5	0,5	0,2	0,5	0,4	0,6	0,4	0,3	1,7	1,4

As eficiências de remoção de matéria orgânica promovido pelo módulo WV-SF em termos de DBO e DQO podem ser considerada satisfatórias, com eficiências de remoção de 85% e 73% e concentrações médias no efluente de 20,5 e 73,7 $mg.L^{-1}$ respectivamente. Apesar de as concentrações afluentes de DBO e DQO apresentarem uma variação considerável, conforme mostra a Fig. 3, as concentrações efluentes mantiveram-se constantes, reforçando o bom desempenho do sistema em absorver sobrecargas orgânicas (MOLLE et al., 2005; PAING et al., 2015). Garcia Zumalacarregui e Von Sperling (2018) monitoraram durante 51 meses um Sistema Francês representando o primeiro estágio com apenas dois módulos, em clima tropical, e obtiveram as concentrações efluentes médias e eficiências de remoção de 87 $mg.L^{-1}$ e 69% para DQO e 49 $mg.L^{-1}$ e 79 % para DBO. Morvannou et al. (2015) realizaram levantamento de dados de 415 WV-SF na França com tempo de operação variando entre 2 e 31 anos e obtiveram concentrações médias e eficiências de remoção, no primeiro estágio, de 74 $mg.L^{-1}$ e 77% para DQO.

No primeiro estágio de um Sistema Francês clássico, as condições para oxidação do nitrogênio amoniacal são pouco favoráveis, devido à competição do oxigênio disponível pelas bactérias heterotróficas para oxidação da matéria orgânica presente em grande quantidade no esgoto bruto. A remoção do nitrogênio amoniacal no primeiro estágio ocorre principalmente pela adsorção no período de alimentação e posterior oxidação durante o período de descanso (MOLLE et al., 2006). As eficiências de remoções de NTK tendem a ser menores nos seis primeiros meses de operação em sistemas WV-SF devido ao fato de as bactérias nitrificantes autotróficas apresentarem uma cinética de crescimento mais lenta, aumentando gradativamente até atingir uma estabilidade, geralmente após 2-3 anos (PAING et al., 2015). No entanto, após a microbiota atingir a estabilidade, em conjunto com o bom funcionamento do sistema, a eficiência de remoção do nitrogênio é considerada satisfatória e se mantém estável, sendo pouco afetada até mesmo sob baixas temperaturas (SILVEIRA et al., 2020).

Revista DAE | São Paulo | v. 70, n 235 / pp 180-192 | Ed. Esp. Mar. 2022

O módulo WV-SF estudado apresentou um desempenho bastante satisfatório no processo de remoção de NTK, atingindo eficiência e concentração média de 87% e 6,7 $mg.L^{-1}$ respectivamente. A transformação biológica do amônio pelo processo de nitrificação pode ser inferida pelo considerável aumento da concentração de nitrato no efluente tratado, com concentrações médias de 14,7 $mgNO_3^-$-$N.L^{-1}$. Esses valores indicam que o biocarvão utilizado no módulo WV-SF estudado apresenta um potencial de adsorção e condições favoráveis para o crescimento de bactérias aeróbias autotróficas. Os resultados obtidos por Morvannou al. (2015) em unidades WV-SF, com tempo de operação maiores que 2 anos, obtiveram concentração afluente e eficiência média para o primeiro estágio de 27 mg.L ¹ e 59% respectivamente. FU et al. (2017) realizaram estudos em filtro de escoamento vertical com carvão ativado granular biologicamente ativo e obtiveram remoções médias de 60% para NH_4^+-N.

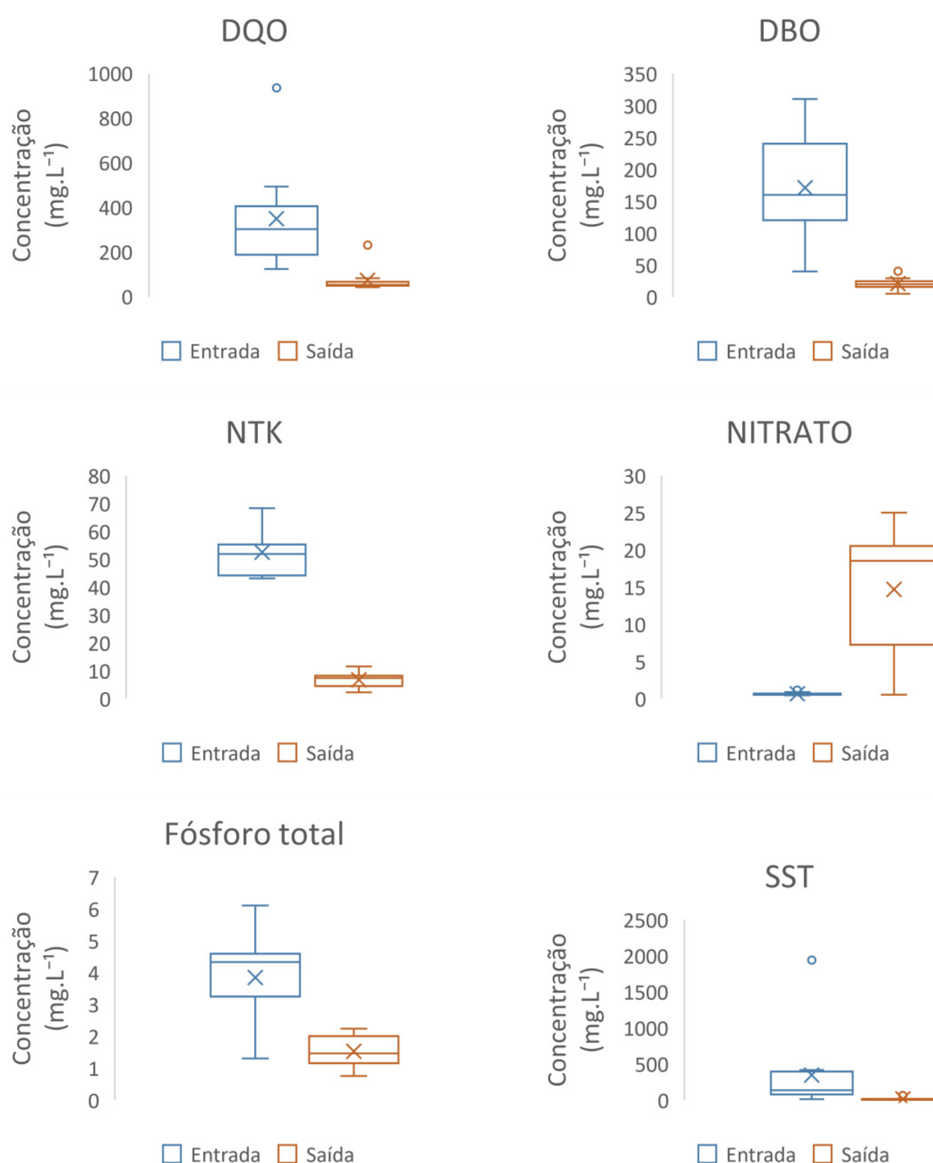


Figura 2 - Variações nas concentrações afluente e efluente ao módulo WV-SF

Em relação ao fósforo, as formas de remoção em WCs ocorrem predominantemente pelos processos de adsorção e precipitação no material filtrante, estando, dessa forma, intimamente associadas às suas propriedades físico-químicas (BRIX; ARIAS; DEL BUBBA, 2001). O módulo WV-SF estudado apresentou eficiência média de remoção de fósforo total de 56% e com concentração média de 1,5 $mgPT.L^{-1}$ no efluente, durante os sete meses de operação. Valores obtidos por Yadav, Chazarenc e Mutnuri (2018) atingiram eficiência média de 34% na remoção de fósforo total no primeiro estágio do Sistema Francês, durante os dez primeiros meses de operação. Apesar de o sistema ter atingido boas eficiências nesse curto espaço de tempo, esses valores tendem a sofrer um decréscimo devido à saturação do fósforo no leito filtrante, que geralmente ocorre próximo ao quinto ano de operação (VOHLA, 2011). Paing et al. (2015) realizaram um amplo estudo em unidades WV-SF e obtiveram eficiências média de remoção de fósforo total em diferentes períodos de operação, resultando em 47% nos primeiros dois anos, 30% do segundo ao sexto ano e de 9% do sexto ao décimo segundo ano de operação. A recuperação do fósforo como fonte de nutriente tem sido uma necessidade iminente nos sistemas de tratamento de esgoto. Molle et al. (2011) obtiveram parâmetros operacionais e de projeto para remoção de fósforo em sistemas WCs utilizando a apatita como material filtrante e adsorvente, com vistas ao reaproveitamento do fósforo como fertilizante na agricultura.

A remoção de SST em WV-SF ocorre principalmente pela retenção na superfície do filtro no primeiro estágio, contribuindo para formação da camada de lodo (MOLLE et al., 2005). Em relação às frações de sólidos presentes no esgoto submetido ao tratamento, o módulo WV-SF apresentou eficiência média de remoção de SST de 90,2%, com concentração média no efluente tratado de 13 $mgSST.L^{-1}$. Resultados obtidos por Morvannou et al. (2015) em WV-SF encontraram eficiência e concentração média no primeiro estágio de 83% e 38 $mg.L^{-1}$, indicando que o biocarvão apresenta boa capacidade de retenção de sólidos nos primeiros meses de operação.

3.2 Perfil hidrodinâmico

Na Fig. 3 apresenta-se o perfil hidrodinâmico da variação da vazão efluente e percentual do volume acumulado no sistema, sob intervalo de cinco meses entre os dois ensaios, sendo que ambos foram realizados no segundo dia de alimentação e sob uma condição de sete dias sem precipitação anterior a realização.

No mês de outubro de 2019, após um mês do início da operação do WV-SF, a curva apresentou um pico maior de vazão, atingindo 9,7 L/min após 5,35 minutos da alimentação do sistema. O ensaio realizado após cinco meses mostrou uma curva com o pico de vazão menos acentuado, atingindo 3,7 L/min, e uma maior uniformidade na distribuição da vazão efluente. Esse comportamento pode estar associado à maior condutividade hidráulica do sistema, na primeira medição, devido à ausência da camada de lodo formada na superfície do leito, fazendo que o esgoto afluente fosse infiltrado próximo ao ponto de alimentação. Após 5 meses, o perfil da curva sugere que o acúmulo de lodo durante esses meses foi responsável por um alagamento na superfície do leito, contribuindo para uma infiltração mais uniforme.

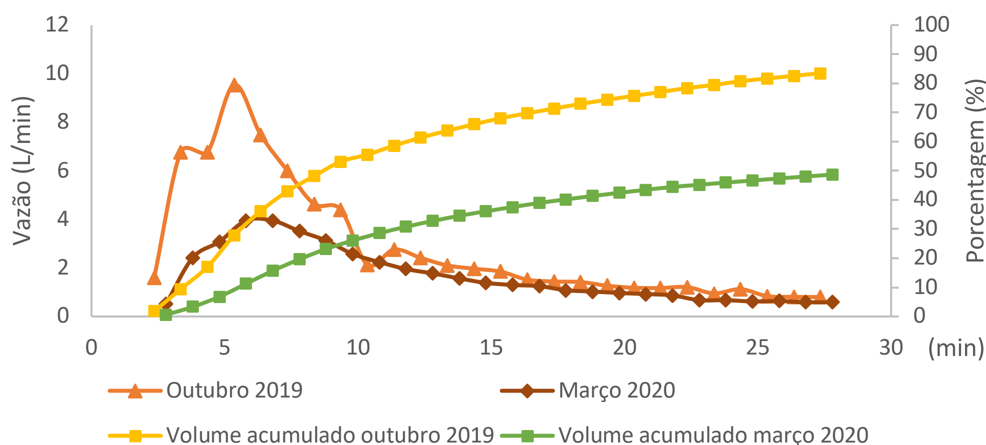


Figura 3 - Perfil hidrodinâmico no início e final do monitoramento

O tempo de percolação médio calculado para cada ensaio foi de 9,9 min após o primeiro mês de operação e 11,6 após o sexto mês de operação do WV-SF. Em filtros verticais, com curtos tempo de percolação (inferior a 10 min) a transferência de oxigênio para o leito, principalmente pelo processo de convecção, torna-se bastante significativa, fazendo com que o volume de oxigênio inserido no leito fique próximo ao volume de esgoto afluente aplicado (PLATZER, 1999).

O volume recuperado do esgoto efluente ao WV-SF no início da operação do sistema (outubro 2019) foi significativamente maior em relação ao sexto mês de operação (março de 2020), atingindo valores respectivamente de 87% e 48% em aproximadamente 30 minutos. Vários fatores podem estar associados às diferenças nos perfis hidrodinâmicos nesse intervalo de cinco meses, como: (1) desenvolvimento das plantas (MOLLE et al., 2006); efeitos sazonais do clima (ARIAS; BERTRAND-KRAJEWSKI; MOLLE, 2014) e acúmulo de lodo na superfície do leito filtrante (GARCÍA ZUMALACARREGUI, 2018; DE ANDRADE MORAES et al., 2019).

4 CONCLUSÕES

O módulo WV-SF estudado apresentou boa performance hidrodinâmica e na remoção de poluentes para as condições operacionais aplicadas, dada a eficiência de remoção média de 85% para $DBO_{5,20}$ e 73% para DQO e de 87% para NTK, produzindo ainda um efluente tratado com concentração média de 14,7 $mgNO_3$ $N.L^{-1}$.

O módulo WV-SF atingiu boas eficiências desde o início de sua operação, mesmo não havendo a camada biológica de lodo formada. Isso demonstra que o biocarvão desempenha boas condições de adsorção e retenção de poluentes.

A forma como foi operado o WV-SF representa uma redução em 60% do requerimento de área superficial de um clássico wetland Sistema Francês de dois estágios, além de utilizar um material filtrante originário de um resíduo de uma usina termelétrica, sem custo de aquisição. Esses fatores podem representar uma redução significativa de custos, viabilizando o tratamento de esgotos em distintas realidades dos municípios brasileiros.

Mesmo o módulo WV-SF tendo apresentado boas eficiências na remoção de poluentes, um maior período de operação permitirá uma melhor avaliação do sistema quanto a possíveis agravos associados ao processo de colmatação e, também, quanto à dinâmica da remoção de nitrogênio e fósforo.

5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Contextualização: Rodrigues EB e Silveira DD; **Metodologia:** Rodrigues EB, Silveira DD, Sezerino PH; **Redação primeira versão:** Rodrigues EB; **Redação revisão e edição:** Rodrigues EB, Silveira DD, Sezerino PH e Lapolli FR; **Apoio financeiro:** Rodrigues EB e Lapolli FR

6 REFERÊNCIAS

ABEDI, T.; MOJIRI, A. Constructed wetland modified by biochar/zeolite addition for enhanced wastewater treatment. **Environmental Technology and Innovation**, v. 16, p. 100472, 2019. https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100472

ÁDÁM, K.; KRISTINE SØVIK, A.; KROGSTAD, T. Sorption of phosphorous to Filtralite-PTM—The effect of different scales. **Water Research**, v. 40, n. 6, p. 1143-1154, 2006. https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.01.009

ARIAS, Carlos A.; DEL BUBBA, Massimo; BRIX, Hans. Phosphorus removal by sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds. **Water research**, v. 35, n. 5, p. 1159-1168, 2001. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00368-7

ARIAS, L.; BERTRAND-KRAJEWSKI, J. L.; MOLLE, P. Simplified hydraulic model of French vertical-flow constructed wetlands. **Water Science and Technology**, v. 70, n. 5, p. 909–916, 2014. https://doi.org/10.2166/wst.2014.309

AWWA/APHA/WEF. APHA, AWWA, WEF. “Standard Methods for examination of water and wastewater.” **APHA, AWWA, WEF. “Standard Methods for examination of water and wastewater.”**, v. 5, n. 2, p. 185–186, 2012.

BARCA, C. et al. Steel slag filters to upgrade phosphorus removal in constructed wetlands: Two years of field experiments. **Environmental Science and Technology**, v. 47, n. 1, p. 549–556, 2013. https://doi.org/10.1021/es303778t

BOLTON, Lise et al. Phosphorus adsorption onto an enriched biochar substrate in constructed wetlands treating wastewater. **Ecological Engineering**: X, v. 1, p. 100005, 2019. https://doi.org/10.1016/j.ecoena.2019.100005

BRIX, H.; ARIAS, C. A.; DEL BUBBA, M. **Media selection for sustainable phosphorus removal in subsurface flow constructed wetlands**. In: Water Science and Technology. Anais... 2001. Disponível em: https://doi.org/10.2166/wst.2001.0808. Acesso em: 3 mar. 2020

CASELLES-OSORIO, A. et al. Efficiency of mesocosm-scale constructed wetland systems for treatment of sanitary wastewater under tropical conditions. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 220, n. 1–4, p. 161–171, 2011. https://doi.org/10.1007/s11270-011-0743-7

COTA, R. DA SI. **Hidrodinâmica e Desempenho Verticais Plantados e com Alimentação em Pulsos empregados no Tratamento de Esgoto Sanitário Bruto**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Saneamento Meio Ambiente e Recursos Hídricos - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. p.195. 2011.

COTA, R. S.; VON SPERLING, M.; PENIDO, R. C. S. Tracer studies and hydraulic behaviour of planted and un-planted vertical-flow constructed wetlands. **Water Science and Technology**, v. 64, n. 5, p. 1056–1063, 2011. https://doi.org/10.2166/wst.2011.544

DALAHMEH, S. S. et al. Potential of organic filter materials for treating greywater to achieve irrigation quality: A review. **Water Science and Technology**, v. 63, n. 9, p. 1832–1840, 2011. https://doi.org/10.2166/wst.2011.387

DE ANDRADE MORAES, M. A. et al. Outflow dynamics in a French system of vertical wetlands operating with an extended feeding cycle. **Water Science and Technology**, v. 79, n. 4, p. 699–708, 2019. https://doi.org/10.2166/wst.2019.088

DE ROZARI, P.; GREENWAY, M.; EL HANANDEH, A. Phosphorus removal from secondary sewage and septage using sand media amended with biochar in constructed wetland mesocosms. **Science of the Total Environment**, v. 569–570, p. 123–133, 2016. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.096

FU, J. et al. Pilot investigation of two-stage biofiltration for removal of natural organic matter in drinking water treatment. **Chemosphere**, v. 166, p. 311–322, 2017. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.101

GARCÍA ZUMALACARREGUI, J. A. **Influência das condições hidrodinâmicas nos processos de conversão aeróbia em *wetlands* construídos de escoamento vertical no tratamento de esgoto doméstico bruto**. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Saneamento Meio Ambiente e Recursos Hídricos - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. p.181. 2018.

GARCÍA ZUMALACARREGUI, J. A.; VON SPERLING, M. Performance of the first stage of the French system of vertical flow constructed wetlands with only two units in parallel: Influence of pulse

time and instantaneous hydraulic loading rate. **Water Science and Technology**, v. 78, n. 4, p. 848–859, 2018. https://doi.org/10.2166/wst.2018.355

HENNE, R. A. **Caracterização da formação e da composição das cinzas e dos problemas associados à combustão da biomassa florestal em caldeira**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal - Universidade do Estado de Santa Catarina. Lages. 2018.

JIA, W., SUN, X., GAO, Y., YANG, Y., & YANG, L. Fe-modified biochar enhances microbial nitrogen removal capability of constructed wetland. **Science of The Total Environment**, p. 139534, 2020. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139534

KADLEC, R.; WALLACE, S. **Treatment Wetlands**. [s.l.] IWA Publishing, 2009.

KANIA, M. et al. Comparative characterization of surface sludge deposits from fourteen French Vertical Flow Constructed Wetlands sewage treatment plants using biological, chemical and thermal indices. **Science of the Total Environment**, v. 647, p. 464-473, 2019. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.440

KANTAWANICHKUL, S.; KLADPRASERT, S.; BRIX, H. Treatment of high-strength wastewater in tropical vertical flow constructed wetlands planted with Typha angustifolia and Cyperus involucratus. **Ecological engineering**, v. 35, n. 2, p. 238-247, 2009. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.06.002

KIM, B.; FORQUET, N. Pore-scale observation of deposit within the gravel matrix of a vertical flow constructed wetland. **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 37, n. 24, p. 3146–3150, 2016. https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1178334

KIZITO, S. et al. Treatment of anaerobic digested effluent in biochar-packed vertical flow constructed wetland columns: role of media and tidal operation. **Science of the Total Environment**, v. 592, p. 197-205, 2017. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.125

LANA, L. C. O. et al. Performance of a single stage vertical flow constructed wetland system treating raw domestic sewage in Brazil. **Water Science and Technology**, v. 68, n. 7, p. 1599–1606, 2013. https://doi.org/10.2166/wst.2013.408

LI, J. et al. Enhanced nitrogen removal in biochar-added surface flow constructed wetlands: dealing with seasonal variation in the north China. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 4, p. 3675–3684, 2019. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3895-9

LOMBARD-LATUNE, R. et al. Resilience and reliability of compact vertical-flow treatment wetlands designed for tropical climates. **Science of the total environment**, v. 642, p. 208-215, 2018. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.036

LOMBARD LATUNE, R. et al. Which plants are needed for a French vertical-flow constructed wetland under a tropical climate? **Water Science and Technology**, v. 75, n. 8, p. 1873–1881, 2017. https://doi.org/10.2166/wst.2017.064

MILLOT, Y. et al. Effects of design and operational parameters on ammonium removal by single-stage French vertical flow filters treating raw domestic wastewater. **Ecological Engineering**, v. 97, p. 516–523, 2016. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.10.002

MOHAN, D. et al. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent - A critical review. **Bioresource Technology**, v. 160, p. 191–202, 2014. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.120

MOLLE, P. et al. How to treat raw sewage with constructed wetlands: an overview of the French systems. **Water Science and Technology**, v. 51, n. 9, p. 11-21, 2005. https://doi.org/10.2166/wst.2005.0277

MOLLE, P. et al. Effect of reeds and feeding operations on hydraulic behaviour of vertical flow constructed wetlands under hydraulic overloads. **Water Research**, v. 40, n. 3, p. 606-612, 2006. https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.11.026

MOLLE, P. et al. Phosphorus removal by the use of apatite in constructed wetlands: Design recommendations. **Water Practice and Technology**, v. 6, n. 3, 2011. https://doi.org/10.2166/wpt.2011.046

MOLLE, P. French vertical flow constructed wetlands: A need of a better understanding of the role of the deposit layer. **Water Science and Technology,** v. 69, n. 1, p. 106–112, 2014. https://doi.org/10.2166/wst.2013.561

MORVANNOU, A. et al. Treatment performances of French constructed wetlands: Results from a database collected over the last 30 years. **Water Science and Technology**, v. 71, n. 9, p. 1333–1339, 2015. https://doi.org/10.2166/wst.2015.089

PAING, J. et al. Effect of climate, wastewater composition, loading rates, system age and design on performances of French vertical flow constructed wetlands: a survey based on 169 full scale systems. **Ecological Engineering**, v. 80, p. 46-52, 2015. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.10.029

PLATZER, Christoph. Design recommendations for subsurface flow constructed wetlands for nitrification and denitrification. **Water Science and Technology**, v. 40, n. 3, p. 257-263, 1999. https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00420-5

PROCHASKA, C. A.; ZOUBOULIS, A. I.; ESKRIDGE, K. M. Performance of pilot-scale vertical-flow constructed wetlands, as affected by season, substrate, hydraulic load and frequency of application of simulated urban sewage. **Ecological engineering**, v. 31, n. 1, p. 57-66, 2007. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.05.007

PUCHER, B.; LANGERGRABER, G. Simulating vertical flow wetlands using filter media with different grain sizes with the HYDRUS Wetland Module. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 66, n. 2, p. 227–231, 2018. https://doi.org/10.1515/johh-2017-0053

SAEED, T. et al. Treatment of tannery wastewater in a pilot-scale hybrid constructed wetland system in Bangladesh. **Chemosphere**, v. 88, n. 9, p. 1065–1073, 2012. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.04.055

SAEED, T. et al. The use of biochar and crushed mortar in treatment wetlands to enhance the removal of nutrients from sewage. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 1, p. 586–599, 2019. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3637-z

SEZERINO, P. H. et al. Experiências brasileiras com wetlands construídos aplicados ao tratamento de águas residuárias: Parámetros de projeto para sistemas horizontais. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 20, n. 1, p. 151–158, 2015.

SHIWEI, C. et al. Performance of constructed wetlands with different substrates for the treated effluent from municipal sewage plants. **Journal of Water Reuse and Desalination**, v. 9, n. 4, p. 452–462, 2019. https://doi.org/10.2166/wrd.2019.032

SILVEIRA, D.D., BELLI FILHO, P., PHILIPPI, L.S., KIM, B., MOLLE, P. Influence of partial saturation on total nitrogen removal in a single-stage French constructed wetland treating raw domestic wastewater. **Ecological Engineering**, v. 77, p. 257-264, 2015. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.01.040

SILVEIRA, D.D., FILHO, P.B., PHILIPPI, L.S., CANTÃO, M.E., FOULQUIER, A., BAYLE, S., DELFORNO, T.P., MOLLE, P., FILHO, P.B., PHILIPPI, L.S., CANTÃO, M.E., FOULQUIER, A., BAYLE, S. In-depth assessment of microbial communities in the full-scale vertical flow treatment wetlands fed with raw domestic wastewater. **Environmental Technology**, p. 1-16, 2020. https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1723709

STEFANAKIS, A. I.; TSIHRINTZIS, V. A. Effects of loading, resting period, temperature, porous media, vegetation and aeration on performance of pilot-scale vertical flow constructed wetlands. **Chemical Engineering Journal**, v. 181–182, p. 416–430, 2012. https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.11.108

SUDARSAN, J. S.; SRIHARI, V. Evaluation of adsorption capacity of biochar mixed substrate to treat tannery wastewater by constructed wetland. In: AIP Conference Proceedings. AIP Publishing LLC, 2019. p. 020176. **Anais...**

SUN, J.J., CHEN, L., RENE, E.R., HU, Q., MA, W.F., SHEN, Z.Y., Biological nitrogen removal using soil columns for the reuse of reclaimed water: Performance and microbial community analysis. **Journal of environmental management**, v. 217, p. 100-109, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.088

VOHLA, C. et al. Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands-A review. **Ecological Engineering**, v. 37, n. 1, p. 70–89, 2011. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.08.003

VON SPERLING, M. **Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal**. [s.l.] IWA Publishing, 2007.

VON SPERLING, M.; SEZERINO, P.H. (2018). Dimensionamento de wetlands construídos no Brasil. Documento de consenso entre pesquisadores e praticantes. **Boletim Wetlands Brasil**, Edição Especial, dezembro/2018. 65 p. ISSN 2359-0548. Disponível em: <https://gesad.ufsc.br/boletins/>.

WANG, Y. et al. Comprehensive evaluation of substrate materials for contaminants removal in constructed wetlands. **Science of the Total Environment,** v. 701, p. 134736, 2020. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134736

XIONG, J.Q., REN, S.H., HE, Y.F., WANG, X.C.C., BAI, X.C., WANG, J.X., DZAKPASU, M. Bioretention cell incorporating Fe-biochar and saturated zones for enhanced stormwater runoff treatment. **Chemosphere**, v. 237, p. 124424, 2019. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124424

YADAV, A.; CHAZARENC, F.; MUTNURI, S. Development of the “French system” vertical flow constructed wetland to treat raw domestic wastewater in India. **Ecological Engineering**, v. 113, p. 88–93, 2018. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.01.001

ZHOU, X. et al. Nitrogen removal in response to the varying C/N ratios in subsurface flow constructed wetland microcosms with biochar addition. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, n. 4, p. 3382–3391, 2019a. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3871-4

ZHOU, XU. et al. Nitrogen removal responses to biochar addition in intermittent-aerated subsurface flow constructed wetland microcosms: Enhancing role and mechanism. **Ecological Engineering**, v. 128, p. 57-65, 2019. ttps://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.12.028

ZHOU, Xu et al. Nitrogen removal responses to biochar addition in intermittent-aerated subsurface flow constructed wetland microcosms: Enhancing role and mechanism. **Ecological engineering,** v. 128, p. 57-65, 2019. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.12.028